эквивалентная ЭДС, рассмотрена в [3]. Исходной информацией для такого эквивалентирования являются параметры установившегося режима эквивалентируемой подсистемы и коэффициенты крутизны $\beta$, $\alpha$.

### Вывод

Замещение частей электрической системы эквивалентными двухполюсниками с заданными статическими характеристиками и коэффициентами крутизны, позволяет в ряде случаев существенно сократить размерность электрической системы (число искомых параметров). Такой подход является целесообразным при исследованиях и моделировании режимов отдельных станций, подстанций, расчетах предельных по статической апериодической устойчивости режимов цепочечных схем (например, дальних электропередач с промежуточными системами). Это дает возможность в обобщенной форме учесть реакцию отдельных частей системы и непосредственно локализовать исследуемый объект.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левинштейн М.Л., Щербачев О.В. Методика расчетов статической устойчивости сложных электрических систем с помощью эквивалентных регулирующих эффектов станций и нагрузок // Известия вузов. Энергетика. – 1962. – № 8. – С. 11–19.
2. Цукерник Л.В., Коробчук К.В. Расчет с помощью ЦВМ предела статической устойчивости сложной энергосистемы // Докл. на II Всесоюз. науч.-техн. совещ. по устойчивости и надежности энергосистем СССР. – М.: Энергия, 1969. – С. 56–62.
3. Готман В.И., Готман О.В. Эквивалентирование подсистем энергообъединений на базе режимных параметров // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 111–114.

*Поступила 20.09.2007 г.*

УДК 621.311.016

# ЕДИНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В.И. Готман

Томский политехнический университет
E-mail: mo@elti.tpu.ru

*Генераторы с автоматическим регулированием возбуждения при исследовании статической устойчивости режимов электрических систем учитываются передаточными функциями. Анализируются условия совпадения свободного числа характеристического уравнения и матрицы Якоби, используемой в расчетах установившихся режимов методом Ньютона, для различных идеализированных моделей генератора. Рассматриваются особенности использования практических критериев устойчивости.*

### Введение

Строгое решение задачи исследования статической устойчивости сложных энергосистем связано с анализом корней характеристического уравнения. Известно, что нарушение устойчивости может проявляться в форме самораскачивания или апериодического характера изменения параметров режима (текучести режима или его сползания). Общепринятым является разделение этой задачи: определение границы нарушения колебательной и апериодической устойчивости. Считая, что нарушение колебательной устойчивости устранено правильной настройкой системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ), границе статической апериодической устойчивости соответствует переход через ноль свободного члена характеристического уравнения ($a_n$) или практических критериев [1, 2].

Для исследования апериодической устойчивости необходимы расчеты установившихся режимов и свободного члена характеристического уравнения. В свою очередь, $a_n$ получается из характеристического определителя (при обращении оператора дифференцирования $p=d/dt$ в ноль), соответствующего системе линеаризованных уравнений переходных процессов исследуемой энергосистемы. Использование метода Ньютона для расчета установившихся режимов требует вычисления матрицы коэффициентов линеаризованных уравнений установившегося режима (матрицы Якоби).

В работе [3] обсуждается совпадение $a_n$ и якобиана для частных условий. В данной работе анализируется возможность максимального сближения структуры $a_n$ и матрицы Якоби в общем случае. Решение задачи основано на представлении генераторов с АРВ их статическими характеристиками. В матрице $a_n$ генераторы представляются коэффициентами крутизны их статических характеристик. При этом матрицу Якоби можно получить из матрицы $a_n$, учитывая те условия, которые принимаются в расчетах установившихся режимов, что позволяет оценить условия их адекватности.

### Характеристический определитель сложной электрической системы

Считаем, что электрическая система содержит $n$ узлов, к которым подключены двухполюсники, замещающие генераторы и нагрузки. В переходном или установившемся режиме для каждого узла $i$ в общем случае справедливы уравнения в форме приращений:

$$\Delta P_i - \Delta P_{Гi} + \Delta P_{Нi} = 0,\ \Delta Q_i - \Delta Q_{Гi} + \Delta Q_{Нi} = 0, \quad (1)$$

в которых положительное направление мощностей для генератора (Г), приняты к узлу; для нагрузки (Н) и пассивной части схемы – от узла. Число уравнений типа (1) равно $n$, а их слагаемые в общем случае являются операторными функциями. Для краткости обозначений примем $F(p)=\overline{F}$. Получим функциональные зависимости выражений, входящих в (1).

*1. Уравнения приращений мощностей генератора с АРВ.*

Выражения активной ($P$) и реактивной ($Q$) мощностей генератора в переходном режиме можно представить как функцию напряжения ($U$) и абсолютной фазы ($\delta_U$)на его выводах:

$$P = \overline{P}(U,\delta_U),\ Q = \overline{Q}(U,\delta_U)$$

и соответственно в форме приращений

$$\Delta P = \overline{\alpha}\Delta U + \overline{\sigma}\Delta\delta_U,\ \Delta Q = \overline{\beta}\Delta U + \overline{\gamma}\Delta\delta_U. \quad (2)$$

Передаточные функции $\overline{\alpha}$, $\overline{\sigma}$, $\overline{\beta}$, $\overline{\gamma}$ находятся из линеаризованной системы алгебраических и оперативных уравнений переходного процесса генератора. Для их нахождения имеем следующую систему [4, 5], таблица.

***Таблица.*** *Уравнения переходного процесса генератора АРВ*

| Математические выражения | Физический смысл | № уравнения |
|---|---|---|
| $P = \dfrac{E_q U}{X_d}\sin\delta_Г,$ $Q = -\dfrac{U^2}{X_d} + \dfrac{E_q U}{X_d}\cos\delta_Г$ | Мощности генератора | (3) |
| $T_j \dfrac{d^2\delta_Г}{dt^2} = P_Т - P$ | Электромеханический переходный процесс | (4) |
| $E_q = E_{qe} - T_{d0}\dfrac{dE'_q}{dt}$ | Переходный процесс цепи возбуждения генератора | (5) |
| $E_{qe} = E_{q0} + \overline{W}_U(U_0 - U) +$ $+\overline{W}_I(I - I_0)$ | Вынужденная ЭДС при АРВ по $U$ и $I$ | (6) |
| $\overline{W}_П = \dfrac{1}{(1+pT_e)(1+pT_р)} \times$ $\times\left[\dfrac{K_{оП}}{1+pT_и} + \dfrac{pK_{1П}}{1+pT_д}\right]$ | Передаточная функция АРВ по П=$U,I$ | (7) |
| $E'_q = E_q\dfrac{X'_d}{X_d} + U\dfrac{X_d - X'_d}{X_d}\cos\delta_Г$ | Связь переходной и синхронной ЭДС | (8) |
| $I = \dfrac{1}{X_d}\left[\begin{matrix}E_q^2 + U^2 - \\ -2E_q U\cos\delta_Г\end{matrix}\right]^{1/2}$ | Ток статора генератора | (9) |

где $E_q$, $X_d$, $X'_d$ – синхронная ЭДС, синхронная и переходная реактивности; $T_j$, $P$, $P_T$ – постоянная инерции машины, электромагнитная мощность и мощность турбины; $\delta_Г=\delta_E-\delta_U$ – внутренний угол генератора; $E'_q$, $E_{qe}$, $T_{d0}$ – переходная, вынужденная ЭДС и постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой цепи статора; $E_{q0}$, $U_0$, $I_0$ – установочные значения регулируемых параметров; $T_e$, $T_p$, $T_и$, $T_д$ – постоянные времени силового, выпрямительного, измерительного и дифференцирующего элементов системы АРВ; $K_{0П}$, $K_{1П}$ – коэффициенты усиления по отклонению и скорости отклонения регулируемого параметра П (величины положительные).

Обращаясь к расчету функций $\overline{\alpha}$, $\overline{\beta}$, подставим выражение $E_{qe}$ из (6) с учетом (9) в уравнение (5) и линеаризуем систему уравнений (3–5, 8) по независимым переменным $E_q$, $E'_q$, $U$, $\delta_E$. Полученная система с учетом замены дифференциальных уравнений операторными запишется так:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & \dfrac{\partial P}{\partial E_q} & 0 & \dfrac{\partial P}{\partial\delta_E} \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -T_j p^2 \\ 0 & -1 & \dfrac{\partial Q}{\partial E_q} & 0 & \dfrac{\partial Q}{\partial\delta_E} \\ 0 & 0 & -1+\sum\limits^{П}\overline{W}_П\dfrac{\partial П}{\partial E_q} & -T_{d0}p & \sum\limits^{П}\overline{W}_П\dfrac{\partial П}{\partial\delta_E} \\ 0 & 0 & \dfrac{\partial E'_q}{\partial E_q} & -1 & \dfrac{\partial E'_q}{\partial\delta_E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta E_q \\ \Delta E'_q \\ \Delta\delta_E \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P}{\partial U} \\ 0 \\ \dfrac{\partial Q}{\partial U} \\ \sum\limits^{П}\overline{W}_П\dfrac{\partial П}{\partial U} \\ \dfrac{\partial E'_q}{\partial U} \end{bmatrix}\Delta U \quad (10)$$

Из (10) получаем интересуемые функции

$$\frac{\Delta P}{\Delta U} = \frac{\overline{A}_{pU}}{\overline{D}_U} = \overline{\alpha},\ \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{\overline{A}_{qU}}{\overline{D}_U} = \overline{\beta}. \quad (11)$$

Здесь и далее в виду громоздкости получаемых выражений они представлены в структурной форме с выделением тех слагаемых, которые содержат сомножитель $p$. В (11) $\overline{D}_U$ – главный определитель системы (10); $\overline{A}_{pU}$, $\overline{A}_{qU}$ – определители, получаемые из главного заменой соответственно столбцов коэффициентов при $\Delta P$ и $\Delta Q$ коэффициентами правой части при $\Delta U$. В структурной форме указанные определители можно представить так:

$$\overline{D}_U = \overline{C}_0 + \overline{C}_1 p,\ \overline{A}_{pU} = \overline{C}_2 T_j p^2,\ \overline{A}_{qU} = \overline{C}_3 + \overline{C}_4 p. \quad (12)$$

Расчет операторных функций $\overline{\sigma}$, $\overline{\gamma}$ согласно (2) осуществляем при условии $U$=const; независимым абсолютным углом выступает $\delta_U$. Линеаризуя уравнение (4) по аргументу $\delta_U$ и переходя к операторной записи, имеем:

$$\frac{\Delta P}{\Delta\delta_U} = \overline{\sigma} = -T_j p^2. \quad (13)$$

Линеаризуя оставшиеся уравнения (3), (5), (8) с учетом (6), (9) по независимым переменным $E_q$, $E'_q$, $\delta_U$ и, переходя к операторной форме, имеем систему:

$$\begin{bmatrix} 0 & \dfrac{\partial P}{\partial E_q} & 0 & \dfrac{\partial P}{\partial\delta_U} \\ -1 & \dfrac{\partial Q}{\partial E_q} & 0 & \dfrac{\partial Q}{\partial\delta_U} \\ 0 & -1+\sum\limits^{П}\overline{W}_П\dfrac{\partial П}{\partial E_q} & -T_{d0}p & \sum\limits^{П}\overline{W}_П\dfrac{\partial П}{\partial\delta_U} \\ 0 & \dfrac{\partial E'_q}{\partial E_q} & -1 & \dfrac{\partial E'_q}{\partial\delta_U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta E_q \\ \Delta E'_q \\ \Delta\delta_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

из которой находим

$$\frac{\Delta Q}{\Delta P} = \frac{\overline{A}_{q\delta}}{\overline{A}_{p\delta}} = \overline{\eta}, \qquad (15)$$

где $\overline{A}_{p\delta}=\overline{C}_5+C_6T_{d0}p$ – главный определитель системы (14); $\overline{A}_{q\delta}=\overline{C}_7+C_8T_{d0}p$ – определитель, получаемый из главного заменой коэффициентов при $\Delta Q$ коэффициентами при $\Delta P$. Содержание коэффициентов $C_0$–$C_8$ приведено в [6]. На базе (15) с учетом (13) находим искомую функцию:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \delta_U} = \overline{\eta}\overline{\sigma} = \overline{\gamma}. \qquad (16)$$

*2. Уравнения приращения мощностей многополюсника.*

Режим многополюсника описываем уравнениями сетевых мощностей в тригонометрической форме [7]: $P=P(U,\delta)$, $Q=Q(U,\delta)$. Разлагая их по независимым переменным $U_i$, $\delta_i$ ($i$=1,...,$n$), получаем систему приращений мощностей:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P}{\partial U} & \dfrac{\partial P}{\partial \delta} \\ \dfrac{\partial Q}{\partial U} & \dfrac{\partial Q}{\partial \delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \delta \end{bmatrix}. \qquad (17)$$

*3. Уравнения приращения мощности нагрузок.*

Нагрузку учитываем статическими характеристиками по напряжению: $P_Н=P(U)$, $Q_Н=Q(U)$ и в линеаризованной форме:

$$\Delta P_Н = \alpha_Н \Delta U, \; \Delta Q_Н = \beta_Н \Delta U. \qquad (18)$$

Для получения характеристического определителя заменяем приращения мощностей в уравнениях (1) равными их выражениями: для генераторов из уравнений (2); для многополюсника согласно (17) и для нагрузки из (18). В результате получаем матричное уравнение (19), в котором:

$$\overline{\alpha}_i = \sum \overline{\alpha}_{Гj} - \sum \overline{\alpha}_{Нj}, \; \overline{\beta}_i = \sum \overline{\beta}_{Гj} - \sum \overline{\beta}_{Нj}, \; j=1,...,k,$$

где $k$ – число однотипных двухполюсников, примыкающих к узлу $i$.

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_1}{\partial U_1}-\overline{\alpha}_1 & \cdots & \dfrac{\partial P_1}{\partial U_n} & \dfrac{\partial P_1}{\partial \delta_1}-\overline{\sigma}_1 & \cdots & \dfrac{\partial P_1}{\partial \delta_n} \\ \dfrac{\partial P_n}{\partial U_1} & & \dfrac{\partial P_n}{\partial U_n}-\overline{\alpha}_n & \dfrac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \cdots & \dfrac{\partial P_n}{\partial \delta_n}-\overline{\sigma}_n \\ \dfrac{\partial Q_1}{\partial U_1}-\overline{\beta}_1 & & \dfrac{\partial Q_1}{\partial U_n} & \dfrac{\partial Q_1}{\partial \delta_1}-\overline{\gamma}_1 & \cdots & \dfrac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} \\ \dfrac{\partial Q_n}{\partial U_1} & \cdots & \dfrac{\partial Q_n}{\partial U_n}-\overline{\beta}_n & \dfrac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \cdots & \dfrac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}-\overline{\gamma}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} = 0 \qquad (19)$$

Отметим, что для подматриц $\partial P/\partial \delta$, $\partial Q/\partial \delta$ (17) и (19) справедливо тождество:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -\sum \frac{\partial P_j}{\partial \delta_j}, \; \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -\sum \frac{\partial Q_j}{\partial \delta_j}, \; j=1,...,n, \; j \neq i. \qquad (20)$$

Это позволяет избавиться от нулевых слагаемых в определителе (19). Сложим столбцы с номерами $n$+1,$n$+2,...,2$n$. В результате с учетом (20) получим новый столбец (2$n$), элементами которого являются передаточные функции ($-\overline{\sigma}_i$) для $i$=1,2,...$n$ и ($-\overline{\gamma}_i$) для $i$=$n$+1,...,2$n$. Учитывая, что $\overline{\sigma}_i=-T_{ji}p^2$, а $\overline{\gamma}_i=\overline{\eta}_i\overline{\sigma}_i$, отмечаем, что все элементы вновь образованного столбца содержат сомножитель $p^2$. Для его удаления осуществим замену переменных согласно связи (13):

$$\Delta \delta_n = \frac{-\Delta P_n}{T_{jn}p^2}. \qquad (21)$$

В результате элементы столбца 2$n$ в (19) будут иметь тот же вид, что и в (26), при условии:

$$K_{j(in)} = T_{ji}/T_{jn} \qquad (22)$$

и коэффициенты $\overline{\eta}_i$ являются операторными.

Проведенная замена переменных приводит к закреплению координаты $\Delta\delta_n$. Коэффициенты вновь образованного столбца при $\Delta P_n$ имеют определенное физическое содержание, о чем будет сказано ниже. Полученный таким образом определитель $D'(p)$ связан с характеристическим следующим соотношением:

$$D(p) = D'(p)T_{jn}. \qquad (23)$$

При условии $p$=0 передаточные функции $\overline{\alpha}$, $\overline{\sigma}$, $\overline{\beta}$, $\overline{\gamma}$ становятся действительными величинами и представляют собой коэффициенты крутизны.

Из первого уравнения (1) с учетом (12), а также из (13) и (16) при $p$=0 имеем: $\alpha$=0, $\sigma$=0, $\gamma$=0. Коэффициент $\beta_Г$ получаем из (11) с учетом содержания $\overline{A}_{qU}$ и $\overline{D}_U$ при $p$=0:

$$\beta_Г = \frac{\partial Q_Г}{\partial U} = \frac{E_q - 2U\cos\delta_Г - K_{0U}U - K_{0I}I}{x_d\cos\delta_Г - K_{0I}\sin\varphi_Г}. \qquad (24)$$

Обращаясь к (15), при условии $p$=0, имеем:

$$\eta_Г = \frac{\partial Q_Г}{\partial P_Г} = \frac{K_{0I}\cos\varphi_Г - x_d\sin\delta_Г}{x_d\cos\delta_Г - K_{0I}\sin\varphi_Г}. \qquad (25)$$

Принимая в (19) $p$=0 и учитывая ранее осуществленную замену переменных, получаем линеаризованную систему уравнений установившегося режима

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_1}{\partial U_1}-\alpha_1 & \cdots & \dfrac{\partial P_1}{\partial U_i} & \cdots & \dfrac{\partial P_1}{\partial U_n} & \dfrac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \cdots & \dfrac{\partial P_1}{\partial \delta_{n-1}} & K_{1(n)} \\ \dfrac{\partial P_i}{\partial U_1} & \cdot & \dfrac{\partial P_i}{\partial U_i}-\alpha_i & & \dfrac{\partial P_i}{\partial U_n} & \dfrac{\partial P_i}{\partial \delta_1} & \cdot & \dfrac{\partial P_i}{\partial \delta_{n-1}} & K_{i(n)} \\ \dfrac{\partial P_n}{\partial U_1} & \cdot & \dfrac{\partial P_n}{\partial U_i} & \cdot & \dfrac{\partial P_n}{\partial U_n}-\alpha_n & \dfrac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \cdot & \dfrac{\partial P_n}{\partial \delta_{n-1}} & 1 \\ \dfrac{\partial Q_1}{\partial U_1}-\beta_1 & \cdot & \dfrac{\partial Q_1}{\partial U_i} & \cdot & \dfrac{\partial Q_1}{\partial U_n} & \dfrac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \cdot & \dfrac{\partial Q_1}{\partial \delta_{n-1}} & \eta_1 K_{1(n)} \\ \dfrac{\partial Q_i}{\partial U_1} & \cdots & \dfrac{\partial Q_i}{\partial U_i}-\beta_i & \cdots & \dfrac{\partial Q_i}{\partial U_n} & \dfrac{\partial Q_i}{\partial \delta_1} & \cdots & \dfrac{\partial Q_i}{\partial \delta_{n-1}} & \eta_i K_{i(n)} \\ \dfrac{\partial Q_n}{\partial U_1} & \cdot & \dfrac{\partial Q_n}{\partial U_i} & & \dfrac{\partial Q_n}{\partial U_n}-\beta_n & \dfrac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \cdot & \dfrac{\partial Q_n}{\partial \delta_{n-1}} & \eta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_i \\ \Delta U_n \\ \cdots \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_{n-1} \\ -\Delta P_n \end{bmatrix} = 0. \qquad (26)$$

главный определитель которой дает коэффициент $a'_n$, связанный со свободным членом характеристического уравнения соотношением аналогичным (23): $a_n=a'_nT_{jn}$. Поскольку $T_{jn}$>0, то об устойчивости энергосистемы можно судить по переходу через ноль определителя (26) при утяжелении режима из заведомо устойчивого состояния. Отметим, что знак $a_n$ ($a'_n$) в устойчивой области зависит от принятого положительного направления потоков в схеме.

### Оценка статической апериодической устойчивости энергосистем

Коэффициентам $K_{j(in)}$ при $\Delta P_n$ в определителе (26) можно придать смысл весовых коэффициентов, определяющих долевое участие генерирующих узлов в покрытии небаланса активной мощности, возникающего при деформации режима. Это долевое участие выражено в пропорции по отношению к небалансу, воспринимаемого узлом $n$.

Если для генераторов в расчетах установившихся режимов в качестве независимых переменных принимаются $P$, $Q$ и они учитываются статической характеристикой $Q_Г=Q(U_Г,P_Г)$, то матрицу Якоби ($W$) можно получить из матрицы (26) при ее незначительной модернизации: принять в качестве балансирующего по активной мощности узел $n$, т. е. считать все $K_{j(in)}$≡0. При этих условиях не равными нулю элементами последнего столбца матрицы $W$ будут $a_{n,2n}=1$, $a_{2n,2n}=\eta_n$. Отсюда следует, что в общем случае матрица Якоби и $a_n'$ не совпадают. Такое совпадение возможно в частном случае: $T_{jn}>>T_{ji}$, т. е. $K_{j(in)}=0$, что соответствует наличию шин «бесконечной мощности» в электромеханическом смысле (постоянство частоты в узле $n$). При расчетах режимов в балансирующем узле ($n$), как правило, задают напряжение. При анализе устойчивости этому адекватно постоянство напряжения в узле $n$. При этих условиях порядок матриц $W$ и $a_n'$ понижается на два: можно исключить строку $2n$ и столбец $n$, а, следовательно, и строку n и столбец $2n$.

Обратимся к условиям совпадения $W$ и $a_n'$ при задании информации для генерирующих узлов в форме $P$, $U$. При расчетах режимов такое представление по ряду причин является более предпочтительным.

То обстоятельство, что для генераторного узла напряжение известно, позволяет понизить порядок главного определителя системы (26) путем исключения столбца коэффициентов, соответствующего заданному напряжению, и строки коэффициентов реактивной мощности этого же узла. Число таких исключений равно числу генерирующих узлов с заданными $P$, $U$. При исследовании статической устойчивости этому соответствует астатическое регулирование напряжения $U_i$=const. Применительно к принятой модели генератора с АРВ это означает, что коэффициент $\beta_{Гi}$, характеризующий «жесткость» регулирования напряжения стремится к бесконечности. Это выполняется при $K_{0U}\to\infty$ и $K_{0I}\neq\infty$. Отметим, что реальная величина $\beta_Г$ (24) существенно зависит от значения $K_{0I}$. Поскольку для АРВ сильного действия значения $K_{0U}$ составляют 50...200 ед. возбуждения/ед. напряжения, а $K_{0I}$ – 1...5 ед. возбуждения/ед. тока, то практически в (26) можно принять условие:

$$\beta_{Гi} >> \frac{\partial P_j}{\partial U_i};\ \frac{\partial Q_j}{\partial U_i};\ \alpha_i,\ j=1,...,n. \qquad (27)$$

Отметим, что наибольшее значение имеет отношение

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i}\Big/\beta_{Гi} \le 0,07.$$

Пользуясь (24), проведем в матрице (26) замену переменных $\Delta U_i=\Delta Q_i/\beta_{Гi}$. С учетом (27) все элементы столбца $i$ можно считать равными нулю за исключением $a_{n+i,i}=-1$, что позволяет понизить порядок матрицы $a_n'$ по числу генерирующих узлов, обеспечивающих $U_i$=const.

В режимах, близких к предельным, вероятно ограничение $Q_Г=Q_{Г\max}$. В этом случае для указанных генераторов условие $U$=const не справедливо, что требует их моделирования статическими характеристиками.

Наряду с отмеченными способами оценки устойчивости используются и практические критерии [1], в частности $dQ/dU$. Прикладывая к узлу $i$ внешнее возмущение $\Delta Q_{i(BH)}$ при условии что $\Delta P_{i(BH)}=0$, находим реакцию в виде $\Delta U_i$, что на базе (26) дает

$$\beta_{i(ВН)} = \frac{\Delta Q_{i(ВН)}}{\Delta U_i} = \frac{D_n}{A_{n+i,i}}, \qquad (28)$$

где $D_n$ – главный определитель матрицы (26); $A_{n+i,i}$ – алгебраическое дополнение.

Следует отметить, что расчету $A_{n+i,i}$ соответствует закрепление неинерционной координаты $U_i$ в матрице $a_n'$. Это позволяет заключить, что $A_{n+i,i}$ является определителем свободного члена характеристического уравнения рассматриваемой энергосистемы, в которой обеспечивается условие $U_i$=const. Естественно, что при этом энергосистема является более устойчивой (имеет больший коэффициент запаса) чем исходная. Поэтому, если двигаться из заведомо устойчивого состояния к границе, то в первую очередь через ноль проходит определитель $D_n$ (при этом $A_{n+i,i}\neq0$), что влечет изменение знака $\beta_{i(BH)}$. При последующем утяжелении режима в неустойчивой области для исследуемой энергосистемы через ноль пройдет $A_{n+i,i}$ и знак $\beta_{i(BH)}$ при этом будет совпадать со знаком в устойчивой области. Это подтверждают результаты, полученные в [8] расчетным путем без их обоснования. Таким образом, устойчивая область с границей $A_{n+i,i}=0$ больше области с границей $D_n=0$. Их отличие определяется электрической удаленностью узла $i$ от узла с $U$=const. Критерий $dP_i/d\delta_i$ не подвержен указанной выше двойственности и меняет свой знак единожды на границе устойчивости. Использование критерия (28) посредством расчета двух определителей более трудоемко, чем использование $W$ или $a_n'$. Практический интерес представляет расчет $\beta_{i(BH)}$ методом численного дифференцирования на базе проверяемого режима. Принимая в узле $i$ $U_i\pm\Delta U_i$ при неизменности режимных параметров во всех прочих узлах схемы, рассчитывается возмущенный режим ($\Delta Q_{i(BH)}$) при условии, что балансирующим по $P$ являются шины бесконечной мощности. Если положительное направление $\Delta Q_{i(BH)}$ принято к узлу $i$, то устойчивому состоянию по (28) соответствует неравенство $\beta_{i(BH)}>0$. Указанный способ оценки устойчивости не привязан к методу и алгоритму расчета режима.

### Выводы

Матрица Якоби уравнений установившегося режима электрической системы будет совпадать со свободным членом характеристического уравнения при следующих условиях.

1. В расчетной схеме должен быть узел, рассматриваемый как шины бесконечной мощности, который принимается балансирующим по активной мощности.
2. В расчетах режимов должны фигурировать те же статические характеристики нагрузок, что и при оценке устойчивости.
3. В расчетах режимов и оценке устойчивости генераторы учитываются одинаковыми статическими характеристиками $Q_Г=Q(U_Г,P_Г)$; при этом для генераторов независимыми переменными являются $Q_Г$, $P_Г$.

Если при расчетах устойчивости пренебречь статизмом АРВ генераторов, т. е. считать $U_i$=const, что практически приемлемо, то условие 3 видоизменится: для генераторных узлов в расчетах режимов в качестве независимых переменных принимаются $U_Г$, $P_Г$.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1970. – 470 с.
2. Lagonotte P., Sabommadiere J.C, Leost J.Y., Paul J.P. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France // IEEE Trans. Power Syst. – 1989. – V. 4. – № 2. – P. 479–486.
3. Веников В.А., Строев В.А., Идельчик В.И. и др. Оценка статической устойчивости электрических систем на основе решения уравнений установившегося режима. // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1971. – № 5. – С. 18–23.
4. Анисимова Н.Д., Веников В.А., Ежков В.В. и др. Методика расчетов устойчивости автоматизированных электрических систем. – М.: Высшая школа, 1966. – 246 с.
5. Pai M.A., Angaonkar R.P. Electromechanical distance measure for decomposition of power systems // Elec. Power and Energy Syst. – 1984. – V. 6. – № 4. – P. 249–254.
6. Готман В.И. Особенности управления и построения единой энергосистемы Азиатской части СССР на базе обобщенных статических характеристик: – Томск: Изд-во ТПИ, 1977. – 96 с.
7. Agarkov O.A., Efimov D.N., Necryachenko O.G. Complex analysis of dynamic properties of electric power systems // Proc. of EPRI-SEI joint Seminar on methods for solving the problems on energy, power system development and control (P. II). – Beijing (China), 1991. – P. 65–76.
8. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 495 с.

*Поступила 20.05.2007 г.*

УДК 621.311.019

# ВЫБОР И ПРОВЕРКА ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ

Л.В. Кривова, А.В. Шмойлов

Томский политехнический университет
E-mail: faharlv@mail.ru

*Разработаны вероятностные критерии рисков перегрузки и разрушения при обосновании выбранных силовых компонентов электроустановок в условиях эксплуатации и аварийных воздействий. Приведен пример проверки жестких сборных шин Сургутской ГРЭС-1.*

При проектировании и эксплуатации развивающихся электроустановок возникают многочисленные задачи выбора и обоснования новых либо обоснования существующих силовых компонентов электростанций, электропередач, районных и распределительных сетей, систем электроснабжения.

Данные задачи обычно предстают в виде определения расчетных эксплуатационных значений электрических величин в условиях длительных установившихся режимов работы, кратковременных ненормальных асинхронных режимов, аварийных электромагнитных процессов коротких замыканий, утяжеленных установившихся режимов и электромеханических переходных процессов (режимные параметры). Названные расчетные значения при выборе и обосновании соответственно сопоставляются с режимными длительно-допустимыми (ДД) и кратковременно-допустимыми (КД) параметрами справочно-каталожных данных, полученных в условиях испытаний.

Как методы и условия определения расчетных значений, так и ДД и КД параметры устанавливаются (рассчитываются, принимаются, назначаются) экспертно-испытательным путем.